

磁光克尔效应

(实验日期: 2025 年 11 月 26 日)

平面偏振光在光洁磁极表面发生反射时, 偏振面会出现微小偏转, 这个现象被称为磁光克尔效应. 它反映了物质磁化状态对其光学性质的影响. 本实验利用了光弹调制技术和锁相放大技术等一系列技术, 测量了一个铁磁样品薄膜 $Pt_{73}Co_{27}$ 的克尔磁滞回线, 观察了磁光克尔效应. 并测量了样品的饱和克尔转角 $\theta_{ks} = 0.196^\circ$ 与矫顽力 $B = 339.432mT$, 并探究了起偏器转角对于磁滞回线的影响. 这加深了我们对磁光效应的理解, 并在同时学习了解和椭偏检测相关的一些技术.

关键词: 磁光克尔效应, 磁滞回线

I. 引言

1877 年, 克尔 (J.Kerr) 发现平面偏振光从光洁磁极表面反射时, 偏振面会发生微小的偏转, 这种现象被称为克尔效应. 克尔效应与法拉第效应、塞曼效应同样, 都是由于物质的磁化状态改变了其光学性质所引起的现象, 被统称为磁光效应 (magneto-optical effect).

磁光效应在磁畴观察、磁光存储、薄膜磁性原位表征、自旋电子学、太阳磁场测量、原子操纵和冷却、光隔离等方面都有重要应用. 由于磁光克尔效应观察的是样品表面的反射光, 不要求样品透明, 其适用范围更宽.

磁光克尔效应被用于观察磁性样品的磁畴结构、磁光存储技术. 近年来, 克尔效应更被用于超薄磁性膜、磁化动态过程和自旋霍尔效应研究.

本实验中, 我们通过光弹调制技术和锁相放大技术, 利用软件半自动化进行椭偏检测, 测量了一个铁磁样品薄膜 $Pt_{73}Co_{27}$ 的克尔磁滞回线, 观察到了磁光克尔效应, 测量了样品的饱和克尔转角和矫顽力, 并探究了起偏器转角对于磁滞回线的影响. 从而加深了我们对磁光效应的理解, 并在同时学习了解光弹调制、锁相放大等一系列检测技术.

II. 理论

本实验仅考虑极入射极克尔效应图 1, 即磁场、入射光线均垂直与样品表面, 系统具有旋转对称性. 据菲涅尔公式, 此时反射率:

$$r_{\pm} = \frac{1 - n_{\pm}}{1 + n_{\pm}}$$

n_{\pm} 分别为左、右旋圆偏光的折射率. 若磁光常量 Q 不为零, 入射的线偏光 (左、右

*

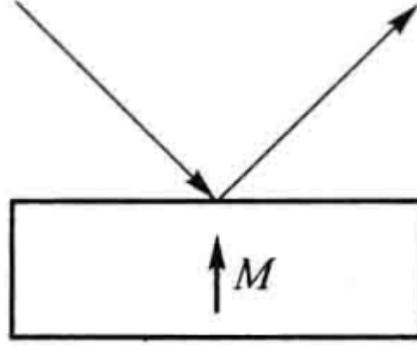


图 1. 极入射极克尔效应示意图 [1]

旋圆偏光的叠加态) 反射后为主轴相对于入射光偏振面转过一个微小角度的椭偏光, 一般用复克尔转角 $\tilde{\theta}_K$ 来描述:

$$\tan \tilde{\theta}_K = \frac{k}{r_F} = i \frac{r_+ - r_-}{r_+ + r_-}$$

由于到 $\tilde{\theta}_K$ 一般比较小:

$$\tilde{\theta}_K = \theta_K + i\epsilon_K \approx \tan \tilde{\theta}_K = \frac{k}{r_F} = -i \frac{n_+ - n_-}{1 - n_+ n_-} \approx -i \frac{nQ}{1 - n^2}.$$

其中, θ_K 和 ϵ_K 分别为复克尔转角的实部和虚部. 也就是克尔转交和克尔椭率. 根据琼斯矩阵等理论, 入射线偏振光在样品表面反射并经过光弹调制器和检偏器后:

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_F & -k \\ k & r_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中 r_F 表示反射光沿着入射光偏振方向 (即 x 方向) 的偏振分量, k 表示沿 y 方向的偏振分量. 它们与复克尔转角之间的关系为: $\tan \tilde{\theta}_K = k/r_F$.

作小量展开, 光强为:

$$\begin{aligned} I(t) &\approx \frac{r_F^2 + k^2}{2} (1 + 2\theta_k \cos \delta - 2\epsilon_k \sin \delta) \\ &= \frac{r_F^2 + k^2}{2} [1 + 2\theta_k J_0(\delta_0) - 4\epsilon_k J_1(\delta_0) \sin \omega t + 4\theta_k J_2(\delta_0) \cos 2\omega t + \dots] \end{aligned}$$

取 $\delta_0 = 2.405$, 锁相放大器测量到的直流分量和一、二次谐波分量振幅与克尔转角、克尔椭率之间有如下关系:

$$\theta_K = B \frac{\sqrt{2}V_{2\omega}}{4V_0 J_2(\delta_0)}$$

和

$$\epsilon_K = -B \frac{\sqrt{2}V_{\omega}}{4V_0 J_1(\delta_0)},$$

其中 B 为标度系数, 是整定器对交直流信号分别进行放大导致的.

III. 实验

A. 实验装置示意

实验装置如图 2 所示.

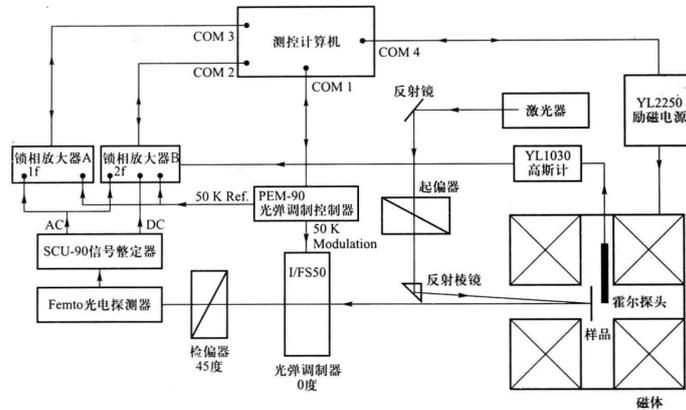


图 2. 磁光克尔实验装置示意图 [1]

本实验实验装置如图 2 所示, 激光器产生的激光经过起偏器后成为线偏振光, 近似垂直入射到样品表面; 出射光经过光弹调制后进入光电探测器, 锁相放大器接收来自光电探测器的信号并将 V_0 、 V_ω 和 $V_{2\omega}$ 传输给计算机. 同时, 计算机还会接收光弹调制控制器的调制频率 ω 和样品处的磁感应强度 B .

B. 实验步骤

1. 调节实验装置

启动全部实验仪器. 调整样品位置, 使得激光束垂直入射到样品表面, 反射光能顺利进入光弹调制器、检偏器、光电探测器. 调整起偏器与光弹调制器平行, 检偏器与起偏器的夹角 45° . 具体操作步骤如下:

1. 先调节检偏器, 使光路达到几乎消光状态, 即锁相放大器的输出信号降至最小;
2. 启动光弹调制器, 调节其振动轴的角度, 直至锁相放大器的输出信号降至最小;
3. 最后, 将检偏器转动 45° .

2. 克尔转角的标度

将起偏器小角度分别旋转 $30'$, 1° , $1^\circ 30'$, 2° , $2^\circ 30'$, 记录下此时锁相放大器的直流分量 V_0 和二次谐波分量 $V_{2\omega}$, 对 $\frac{V_{2\omega}}{V_0} - \theta_k$ 作线性拟合, 得到标定系数 α

3. 测量克尔磁滞回线

使用测控计算机上的测控程序, 设定初始磁场、末态磁场、步长和采样时间、选择回线模式, 利用刚才标定的标度系数 α , 系统将自动采集并显示数据曲线.

4. 探究克尔转角和起偏器角度的关系

改变起偏器角度, 分别相对起偏器的刻度为 $339^{\circ}45'$ 转动 $1^{\circ}, 2^{\circ}, -1^{\circ}, -2^{\circ}$ 以及接近 -4° , 观察各个角度的磁滞回线, 探究克尔转角和起偏器角度的关系.

IV. 结果及讨论

按照上述实验步骤对仪器进行调节, 得到起偏器的刻度为 $339^{\circ}45'$, 光弹调制器的角度为 $280^{\circ}0'$, 检偏器的角度为 $43^{\circ}45'$.

克尔转角的标度系数为 $-6.84 \times 10^{-2}/^{\circ}$.

A. 测量克尔磁滞回线

采用起始磁场为 -1000 mT, 末态磁场为 1000 mT, 步长为 200 mT, 对起偏器的刻度为 $339^{\circ}45'$ 下的克尔磁滞回线进行测量, 得到克尔转角和克尔椭率. 但由于该图像的对称性较差, 对于饱和克尔转角、矫顽力的读数、以及后续的分析不太友好, 我们选取相对起偏器的刻度为 $339^{\circ}45'$ 转动 -1° 的图像进行分析, 其克尔转角和克尔椭率分别如图 3 和图 4 所示, 该图对于实验中采集得到的数据点做了线性内插.

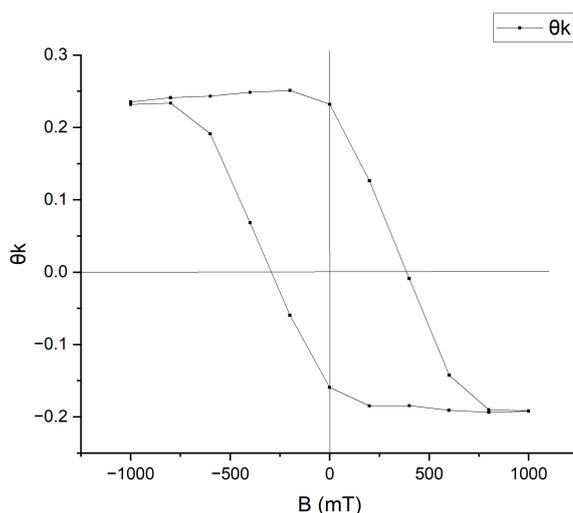


图 3. 克尔转角磁滞回线

观察克尔转角的磁滞回线并测量, 可以发现:

1. 克尔转角具有较为明显的磁滞回线特征.

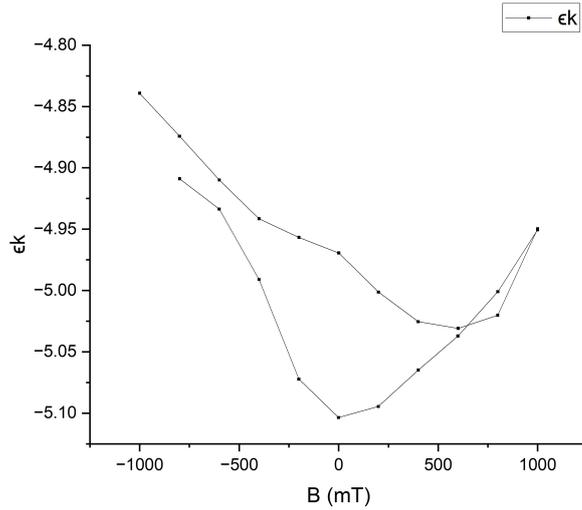


图 4. 克尔椭率磁滞回线

2. 饱和克尔转角为 $\theta_{ks} = 0.196^\circ$

3. 矫顽力为 $B = 339.432mT$

观察克尔椭率的磁滞回线, 发现:

1. 克尔椭率的磁滞回线特征并不明显.
2. 这是因为, 克尔椭率主要由一次谐波分量决定, 而实验装置中, 光线容易被反射、折射, 导致与我们希望测量的一次谐波分量产生干涉. 从而导致结果较为混乱.

B. 探究克尔转角和起偏器角度的关系

根据实验步骤所示多次改变起偏器的角度, 得到磁滞回线如图 5 所示.

分析上述图像, 可以发现各条曲线磁滞回线的形态无显著变化, 相互之间近似为上下平移的关系. 读取每条磁滞回线的中心克尔转角与起偏器转角之间的关系, 得到如图 6 所示的关系图.

可以发现中心克尔转角与起偏器转角呈线性关系, 斜率为 0.816, 与 1 非常接近, 验证了测量的克尔转角与起偏器夹角之间为 $\theta_k = \theta_0 + \theta_{ki}$ 的关系. 其中, θ_k 为测量的克尔转角, θ_0 为某一常数, θ_{ki} 为样品本身的克尔转角.

V. 结论

本次实验, 我们利用样品 $Pt_{73}Co_{27}$ 合金薄膜, 借助光弹调制器、锁相放大器等, 通过椭偏检测技术实现了对微小克尔转角的测量, 观测到了磁光克尔效应. 通过小范围下改变起偏器角度, 确定标定系数为 $-6.84 \times 10^{-2}/^\circ$. 通过测定样品的克尔磁滞回线, 得到了样品对于 632.8nm 波长的激光的饱和克尔转角 $\theta_{ks} = 0.196^\circ$, 矫顽力为

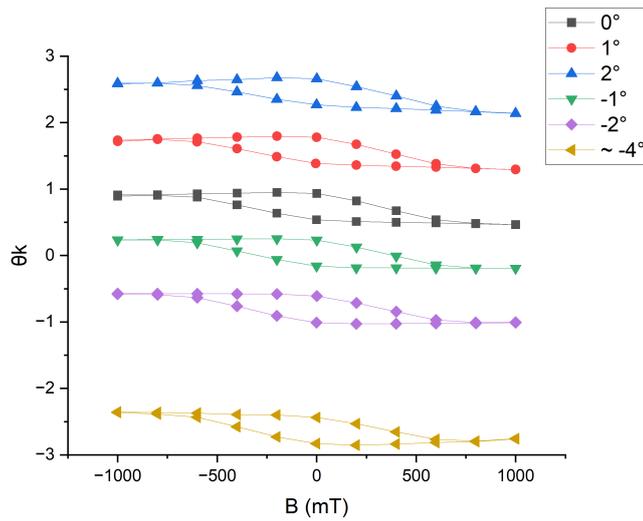


图 5. 不同起偏器角度下的克尔转角磁滞回线

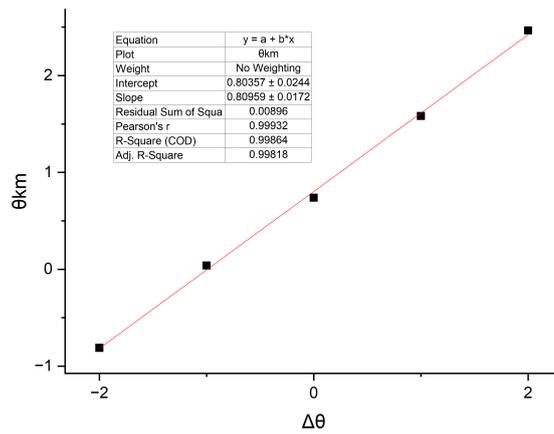


图 6. 起偏器转角与中心克尔转角的关系

$B_c = 339.432mT$. 证明了样品具有铁磁性. 同时研究了起偏器角度对于克尔转角的影响, 验证了测量的克尔转角与起偏器夹角之间为线性关系.

致谢

感谢搭档***和周路群老师的指导和帮助.

[1] 吴思诚 and 苟坤, 近代物理实验, 第 4 版 ed. (高等教育出版社, 北京, 2015).

附录 A: 思考题

1. 我们的实验装置对克尔转角和克尔椭圆率的测量精度是否一样高? 为什么?

不一样高. 克尔转角正比于二次谐波分量, 克尔椭圆率正比于一次谐波分量. 光束在光弹调制晶体的两个表面和其他地方发生多次折射、反射, 导致光束干涉现象, 影响一次谐波的测量, 所以对克尔椭圆率的测量是不准确的.

2. 如果用一个以角速度 ω 旋转的 $\frac{\lambda}{2}$ 波片代替光弹调制器, 光电探测器的输出信号会如何变化, 是否也能测出复克尔转角?

以角速度 ω 转动的 $\frac{\lambda}{2}$ 波片, 其琼斯矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\omega t & \sin 2\omega t \\ \sin 2\omega t & -\cos 2\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_F \\ k \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (\sin 2\omega t + \cos 2\omega t)r_F + (\sin 2\omega t - \cos 2\omega t)k \\ (\sin 2\omega t + \cos 2\omega t)r_F + (\sin 2\omega t - \cos 2\omega t)k \end{bmatrix}$$

光强为:

$$I(t) = r_F^2 + k^2 + r_F^2 \sin 4\omega t - k^2 \sin 4\omega t + r_F k (\sin 4\omega t - 1).$$

由此可见, 出射光的强度包含直流分量和四次谐波分量, 而四次谐波分量中耦合信息, 因此无法实现对复克尔转角的实部和虚部的有效提取, 因此不能测出复克尔转角.